



## Optimization of gain flattened fiber Raman amplifier model with binary search equation based adaptive artificial bee colony (BSEAABC) algorithm

Vehbi Yolcu<sup>1\*</sup>, Murat Yücel<sup>2</sup>, Doğan Aydın<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Computer Programming, Simav Vocational School, Kütahya Dumlupınar University, 43500, Kütahya, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Electrical & Electronics Engineering, Faculty Technology, Gazi University, 06570, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>Department of Computer Engineering, Faculty Engineering, İzmir Katip Çelebi University, 35640, İzmir, Türkiye

### Highlights:

- Binary search equation based adaptive artificial bee colony algorithm (BSEAABC) was utilized.
- Fiber Raman amplifier (FRA) equation was solved.
- Optimum wavelengths and power values were found with the number of pumps.

### Keywords:

- Fiber Raman amplifier
- Artificial Bee Colony
- BSEAABC
- Pump Optimization

### Article Info:

Research Article

Received: 19.05.2022

Accepted: 24.12.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1118745

### Correspondence:

Author: Vehbi Yolcu

e-mail:

vehbi.yolcu@dpu.edu.tr

phone: +90 505 398 4933

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, a distributed fiber Raman amplifier (FRA) system was established by sending 4, 8, and 16 pump signals respectively in the opposite direction to 100 optical signals advancing on a fiber line with a distance of 50 km (Table A). In order to flatten the signal gain in the established system, the non-linear FRA model was defined as an optimization problem and solved with the binary search equation based adaptive artificial bee colony algorithm (BSEAABC). The optimum pump powers and wavelength values found are presented below.

**Table A.** The results obtained by using 4, 8, and 16 pump signals

Number of pumps	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Wave length(nm)	1447.5.2	1419.4	1432.3	1482.6												
Power (mW)	41.2	83.8	58.8	220.5												
Wave length(nm)	1453.2.2	1444.1	1430.6	1400.9	1402.1	1506.5	1461.2.6	1414.6								
Power (mW)	30.5	45.7	40.3	24.1	108	233	28.8	70.5								
Wave length(nm)	1431.9	1426.5	1465.4	1402.7	1488	1404.6	1415	1452.6	1442.9	1442.2	1425.7	1459.3	1412.2	1503	1419	1448.8
Power (mW)	36	8.2	17.7	57.4	22.7	16	2.1	26.1	23.2	9.7	4	19.5	51.2	197	34.8	2

**Purpose:** In this study, the optimum wavelengths and frequencies of the pump signals sent to the system for 100 optical signals, whose gain was tried to be flattened in SMF-28 type fibers, were found with the binary search equation based adaptive artificial bee colony algorithm (BSEAABC).

**Theory and Methods:** The most important interactions in the simplified model of FRAs; pump-pump, pump-signal interactions, together with the wavelength-dependent attenuation coefficient acting on the signals and the pumps. In the study, the nonlinear differential equation of FRA was solved. In the established FRA system, classical Raman gain coefficient and attenuation coefficient of SMF-28 optical fiber were used.

**Results:** In this study, the optimum wavelengths and frequencies of the pump signals sent to the system for 100 signals whose gain was tried to be flattened in SMF-28 type fibers were solved with the BSEAABC algorithm. When the results were examined, the average net gain difference obtained by using 4 pumps was found to be 0.16 dB, and the net gain difference was found to be  $0 \pm 0.4$ dB. The average net gain difference obtained by using 8 pumps was 0.043 dB, and the net gain difference was  $0 \pm 0.1$ dB. The average net gain difference obtained by using 16 pumps was determined as 0.028 dB, and the net gain difference was determined as  $0 \pm 0.05$  dB.

**Conclusion:** It is thought that in parallel with the development of algorithms produced within the scope of artificial intelligence technology, solution performances similar to this study will improve and thus the efficiency obtained will increase.



## Kazancı düzleştirilmiş fiber Raman yükselteç modelinin ikili arama denklemlerle adaptif yapay arı kolonisi (İADAYAK) algoritması ile optimizasyonu

Vehbi Yolcu<sup>1\*</sup>, Murat Yücel<sup>2</sup>, Doğan Aydın<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Simav Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Programcılığı Bölümü, 43500, Kütahya, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 35640, İzmir, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- İkili arama denklemlerle adaptif yapay arı kolonisi algoritması (İADAYAK) kullanıldı
- Fiber Raman yükselteç (FRY) denklemi çözümlendi
- Pompa sayısı ile optimum dalga boyları ve güç değerleri bulundu

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 19.05.2022

Kabul: 24.12.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1118745

### Anahtar Kelimeler:

Fiber Raman yükselteci,  
yapay arı kolonisi,  
İADAYAK,  
pompa optimizasyonu

### ÖZ

Yüksek bant genişliğine duyulan ihtiyaç sebebiyle dağıtık fiber Raman yükselteçlerine (FRY) olan ilgi artmaktadır. FRY'ler geniş bant aralığını kullanmasının yanında düşük gürültü faktörü avantajı ve kullanımdaki basitlik ile de ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada SMF-28 türü fiberlerde kazancı düzleştirilmeye çalışılan 50 km mesafeye sahip bir fiber hatta ilerleyen 100 adet optik sinyale zıt yönde sırasıyla 4, 8, 16 adet pompa sinyali göndererek dağıtık fiber Raman yükselteç sistemi kurulmuştur. Kurulan sistemde sinyal kazancını düzleştirmek için lineer olmayan FRY modeli, optimizasyon problemi olarak tanımlanarak ikili arama denklemlerle adaptif yapay arı kolonisi algoritması (İADAYAK) ile çözülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde 4 adet pompa kullanılarak elde edilen ortalama net kazanç farkı 0,16 dB, net kazanç farkı ise  $0 \pm 0,4$  dB olarak bulunmuştur. 8 adet pompa kullanılarak elde edilen ortalama net kazanç farkı 0,043 dB, net kazanç farkı ise  $0 \pm 0,1$  dB olarak ortaya çıkmıştır. 16 adet pompa kullanılarak elde edilen ortalama net kazanç farkı 0,028 dB, net kazanç farkı ise  $0 \pm 0,05$  dB olarak tespit edilmiştir. Yapay zekâ teknolojisi kapsamında üretilen algoritmaların gelişmesi paralelinde bu çalışmaya benzer çözüm performanslarının gelişeceği ve bu sayede elde edilen verimin artacağı düşünülmektedir.

## Optimization of gain flattened fiber Raman amplifier model with binary search equation based adaptive artificial bee colony (BSEAABC) algorithm

### H I G H L I G H T S

- Binary search equation based adaptive artificial bee colony algorithm (BSEAABC) was utilized.
- Fiber Raman amplifier (FRA) equation was solved.
- Optimum wavelengths and power values were found with the number of pumps

### Article Info

Research Article

Received: 19.05.2022

Accepted: 24.12.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1118745

### Keywords:

Fiber Raman amplifier,  
artificial bee colony,  
BSEAABC,  
pompa optimizasyonu

### ABSTRACT

Due to the need for high bandwidth, there is growing interest in distributed fiber Raman amplifiers (FRA). In addition to using wide bandwidth, FRAs also come into prominence with the advantage of low noise factor and simplicity in use. In this study, a distributed fiber Raman amplifier (FRA) system was established by sending 4, 8, and 16 pump signals respectively in the opposite direction to 100 optical signals advancing on a fiber line with a distance of 50 km, whose gain is tried to be flattened in SMF-28 type optical fibers. In order to flatten the signal gain in the established system, the non-linear FRA model was defined as an optimization problem and solved with the binary search equation based adaptive artificial bee colony algorithm (BSEAABC). When the results were examined, the average net gain difference obtained by using 4 pumps was found to be 0.16 dB, and the net gain difference was found to be  $0 \pm 0.4$  dB. The average net gain difference obtained by using 8 pumps was 0.043 dB, and the net gain difference was  $0 \pm 0.1$  dB. The average net gain difference obtained by using 16 pumps was determined as 0.028 dB, and the net gain difference was determined as  $0 \pm 0.05$  dB. It is thought that in parallel with the development of algorithms produced within the scope of artificial intelligence technology, solution performances similar to this study will improve and thus the efficiency obtained will increase.

## 1. Giriş (Introduction)

Optik fiberli haberleşme sistemleri son yüzyıldan günümüze uzanan gelişmelerle birlikte iletim kapasitesi alanında büyük gelişmeler göstermiştir [1]. Bu gelişmeler ışığında yaklaşık 1 GB/s hızındaki tek sinyal işaretinin tek bir optik fiber üzerinden iletildiği sistemlerden, birden çok sinyal işaretinin farklı dalga boylarında ve her biri yaklaşık olarak 550 GB/s hızında olan 224 adet veri sinyalinin tek bir optik fiber üzerinden iletilebildiği günümüz iletim teknolojisine ulaşılmıştır [2]. Yüksek bant genişliğine artan ihtiyaç sebebiyle dağıtık Fiber Raman Yükselteç (FRY)'lere olan ilgi oldukça artmaktadır. FRY'ler geniş bant aralığını kullanmasının yanında düşük gürültü faktörü avantajı ve kullanımdaki basitlik ile de ön plana çıkmaktadır. FRY'ler, fiber yapısına katkı yapılarak elde edilen diğer yükselteç sistemleri yerine yine kendi içerisindeki pompa güçlerine ve pompa dalga boylarına bağlıdır. FRY'lerin yukarıda sayılan tüm avantajları neticesinde sinyaller daha uzak mesafelere tek seferde bozulmadan iletilebilmektedir [3].

FRY'lerde herhangi bir malzeme içerisine kendi eşik güç seviyesinden daha az şiddetli bir ışın gönderildiğinde belli bir dalga boyu (frekans) kayması yaparak gönderilen ışın her yöne rastgele saçılmaktadır. Bu dalga boyu kayması her madde için değişkenlik gösterir. Bu miktar, oksijen için yaklaşık 43 THz, benzen için 28 THz iken silika fiber için yaklaşık 13 THz' dir. Bahsedilen dalga boyu kayma miktarına Raman kayması adı verilir. Her yöne rastgele saçılan Stokes ışınına da kendiliğinden Raman saçılması adı verilir. Eğer rastgele saçılan ışın kendi güç eşliğinden daha şiddetli olursa ışın bir üst enerji seviyesine ulaşarak uyarılmış duruma geçmektedir [4]. Buna literatürde uyarılmış Raman saçılması ismi verilmiştir. Raman saçılmasının genel olarak iki türü vardır. Stokes saçılımı, pompa ve sinyal arasındaki fark neticesinde bir üst enerji seviyesine geçen türdür. Anti-Stokes saçılımı ise molekülün pompa fotonu soğurduğu durumda görülen türdür [5].

Silika fibere gönderilen pompa ve sinyal ışınlarının dalga boyları farkı yaklaşık 100 nm (13 THz) dolaylarında ise uyarılmış Stokes saçılımı sinyali kuvvetlendirmekte fakat pompanın gücünü tüketmektedir. İşte bu durum FRY'lerin temelini oluşturmaktadır [6]. Bu fiziksel olay neticesinde silika fiber içerisine belli dalga boyu aralıkları ile çok sayıda pompa ve sinyal ışınları gönderildiğinde sinyal ışınları fiber kayıplarını Raman saçılması neticesinde pompa güçlerinden telafi ederek uzak mesafelere gücünü kaybetmeden ulaşabilmektedir. Fakat silika fibere gönderilecek pompa güçlerinin ve dalga boylarının, sinyallerin sayısına, gücüne ve dalga boyuna göre ayarlanması gerekmektedir. Mesela C ve L bandında başlangıçta 1 mW gücünde 100 adet sinyal, silika fibere belli dalga boyunda gönderildiğinde kilometrelerce uzağa yine 1 mW gücünde ulaşabilmesi için, sisteme eklenecek pompaların güçleri, dalga boyları ve adetlerinin numerik analizle optimize edilmesi literatürde araştırma konusu olarak karşımıza çıkmaktadır [7].

Literatür incelendiğinde son yıllarda gelişen optik fiber teknolojileri ile beraber FRY optimizasyonu alanında son yirmi yılda yapılmış çalışmalara rastlanmaktadır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde FRY kapsamında kurulan sistemlerin ve kullanılan algoritmaların çeşitliliği dikkat çekmektedir. Perlin ve Winful yaptıkları çalışmada 100 adet optik sinyal ve farklı sayıda pompalar kullanarak, pompa güçlerini ve dalga boylarını genetik algoritma ile optimize etmişler ve literatüre sunmuşlardır [7]. Hu vd., sırasıyla 20, 40 ve 80 adet optik sinyali, farklı sayıda pompa kullanarak genetik algoritma ile optimize etmişlerdir [8]. Jiang ve arkadaşları C ve L bandını kullandıkları 100 adet optik sinyal ile farklı sayıda pompa sinyalleri ile oluşturduğu FRY sistemini, metasezgisel algoritma ile optimize ederek sonuçlarını literatüre kazandırmışlardır [9]. Liu ve arkadaşları FRY kapsamında

belirli sayıda optik sinyaller ve pompalardan oluşturdukları sistemi yeni bir metasezgisel algoritma ile optimize etmişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde hem algoritmanın çalışma süresinin çok kısaldığı sonucuna varmışlar hem de optimizasyon sonucu olarak kabul edilebilir desibel değerleri elde etmişlerdir [10]. Ayrıca farklı tür algoritmaların kullanıldığı çalışmalar da göze çarpmaktadır [11–13]. Bu çalışmada öncelikle FRY kapsamında C ve L bandında sinyallerin, E ve S bandında pompaların bulunduğu bir sistem oluşturulmuştur. Sonrasında sistemi oluşturan pompaların dalga boyları ve güçleri geliştirilmiş metasezgisel algoritma kullanılarak optimize edilmiş ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Belirli şartlar ve kısıtlamalar içeren bir problemde en iyi sonuç alma süreci "Optimizasyon" olarak isimlendirilir. Bu süreç genelde bir fonksiyonun en az veya en çok olduğu durumda fonksiyonu oluşturan değişken değerlerini bulmak olarak özetlenebilir [14]. Gerçek dünyada birçok farklı alanda problem türleri mevcuttur. Bu problemlerin çoğunun çözümü karmaşık süreçler içerir. Literatürde, gerçek yaşamda karşılaşılan bu problemleri çözmek için farklı optimizasyon metodları önerilmiştir. Bunlardan ilki kesin sonuç veren klasik metodlar (deterministik) ikincisi ise yaklaşık sonuç veren sezgisel metodlardır (stokastik). Deterministik metodlar belirli bir sürede kesin sonuç vermeyi garanti ederler. Bunu çözüm uzayında yer alan bütün muhtemel sonuçları tarayarak yapar. Bu sebeple problem türü ve problem boyutuna göre hesaplama maliyeti yükselmektedir. Ayrıca, problem durumuna göre birden fazla en iyiye sahip çözümlerde yerel en iyiye takılma ihtimali vardır. Optimizasyon metodlarının ikinci kategorisi olan sezgisel yöntemler ise kesin sonuçtan ziyade doğru sonuca en yakın değeri bulur. Böylelikle yüksek hesaplama maliyeti olabilecek durumlarda daha düşük maliyetli fakat kabul edilebilir sonuçlar üretirler. Aynı şekilde problemin çözümü, zorluk derecesi ve boyutu bakımından daha az maliyetlidir.

Sürü zekâsı, doğada yer alan canlıların bir bütün olarak hareketleri sonucunda ortaya koydukları karmaşık davranışların bilgisayar sistemlerine modellenmesiyle ortaya çıkan tekniklerdir. Canlıların birlikte gösterdiği merkezi olmayan, öz-örgütlü ve bütünsel yapılar modellenerek bilim insanları tarafından problemlerin çözümlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Böylelikle, Sürü Zekâsı (SZ) algoritmaları literatürde yer almaya başlamıştır [14]. Bu bağlamda çok çeşitli sürü zekâsı algoritması geliştirilmiş ve literatüre sunulmuştur. Bunlardan biri, arıların yiyecek arama davranışından esinlenen Yapay Arı Kolonisi (YAK) algoritmasıdır. YAK algoritmasında arıların bütün davranışları doğada oldukları gibi bire bir modellenmemiş ve bunun yanında da algoritma ile ilgili bazı ön kabullerde bulunulmuştur. Bu ön kabullerden biri her bir besinin çıkarılmasında sadece bir görevli arının olmasıdır. Bu sebeple algoritmada yer alan besin sayısı ile görevli arı sayısının birbirine eşit olduğu kabul edilir. Bir diğer ön kabul ise günlük hayattaki sistemden farklı olarak işçi arı ile gözcü arı sayısının birbirine eşit olmasıdır. Böyle bir kabulde bulunulmasına rağmen aslında bir besine gidip gelen arının görevli olduğu besin kaynağı tükendiğinde bu arının kâşif arı olarak görevini sürdürdüğü kabul edilir. Ayrıca bir besinin kalitesi ne kadar yüksekse o kaynağın uygunluk değeri de o kadar iyidir. Yukarıda yer alan bu ön kabuller ışığında YAK algoritması ile en iyi (optimum) çözümün elde edilmesine çalışılır. YAK algoritmasının sözde kodu aşağıdaki gibi özetlenebilir [15].

- Başlangıç popülasyonu oluştur ve değerleri ilkle
- Bitiş koşulunu sağlayana kadar dön
- İşçi arı aşaması
- Gözcü arı aşaması
- Kâşif arı aşaması
- Döngü bitiminde hafızaya alınan en iyi değerleri döndür.

Bir sayısal optimizasyon problemini çözerken, bir YAK algoritmasının etkinliği, çoğunlukla işçi arı ve gözlemci arı adımlarında kullanılan arama denklemlerine bağlıdır. Bu nedenle, klasik YAK algoritmasını iyileştirmek için literatürde birçok arama denklemi önerilmiştir [16]. Ancak, her problem türü için uygun arama denklemi farklılık gösterebilir ve bu nedenle seçilen bir arama denklemi her problem için iyi sonuçlar elde edemeyebilir. Ayrıca, algoritma performansını etkileyen bir diğer önemli faktör, seçilen arama denklemi ile değiştirilecek değişkenlerin (boyutların) sayısıdır. Klasik YAK algoritmasında arama denklemi rasgele seçilen sadece bir değişkeni günceller. Bu yaklaşımın algoritmanın çeşitlendirme davranışını güçlendirdiği fakat yakınsama hızını yavaşlattığı bilinmektedir. Birden çok değişkenin tek seferde değiştirildiği durumlarda ise seçilen arama denkleminin yapısına göre algoritmanın odaklanma veya çeşitlendirme davranışı ayarlanabilmektedir. Fakat odaklanma veya çeşitlendirmenin ne ölçüde katkı sağlaması gerektiği yine problem türüne göre değişiklik gösterir [17]. Bu çalışmada, sözü geçen bu problemlerin üstesinden gelebilmek için adaptif bir arama denklemi seçim stratejisi önerilmiş ve teorik kısımda sunulmuştur.

## 2. Teorik Metot (Theoretical Method)

### 2.1. Denklem, Değişken ve Sisteme Ait Bilgiler (Equation, Variable and System Information)

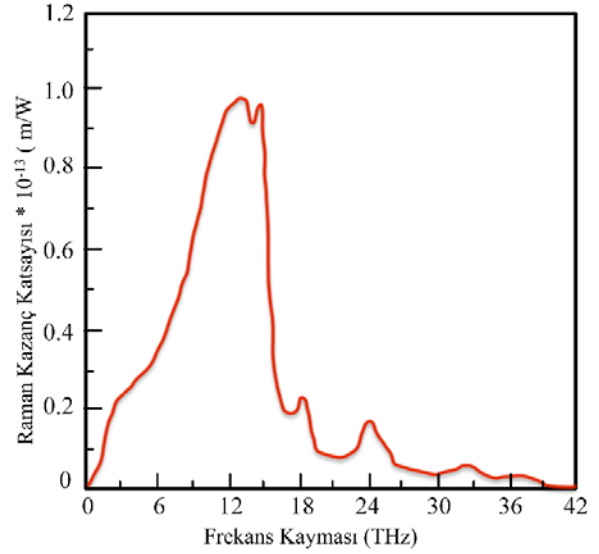
FRY'lere ait genel model tüm sinyal ve pompalar ile birlikte, Kendiliğinden yükseltilmiş yayılma (Amplified Spontaneous Emission- ASE) gürültüsünü de içermektedir. Ancak FRY'de ASE gürültüsü ihmal edilebilir olduğundan bazı kaynaklarda hesaplamalara dâhil edilmemektedir. FRY modelinde en önemli etkileşimler; pompa-pompa, pompa-sinyal etkileşimleri bununla birlikte sinyal ve pompalara etki eden dalga boyuna bağlı zayıflama katsayılarıdır. Eş. 1'de FRY modelinin matematiksel eşitliği verilmiştir [7].

$$\pm \frac{dP_k}{dz} = -\alpha_k P_k + \sum_{j=1}^{k-1} \frac{g_{vj}(v_j - v_k)}{\Gamma_{A_{eff}}} P_j P_k - \sum_{j=k+1}^{m+n} \frac{v_j g_{vk}(v_k - v_j)}{\Gamma_{A_{eff}}} P_j P_k$$

$$k = 1, 2, 3, 4 \dots \dots, n + m \quad (1)$$

Yukarıda matematiksel denklemin lineer olmayan bir diferansiyel denklem olduğu açıkça görülmektedir. Eşitlikte öncelikle sinyal dalga boylarının negatif olmaması için sinyaller azalan sırada birbirini takip etmelidirler. Bu sebeple  $j > i$  için  $v_i > v_j$  olmalıdır.  $k = 1, 2, 3, 4 \dots \dots, n'$ 'e kadar olan indisler  $z = L$  noktasından  $z = 0$  noktasına doğru geri yönde hareket eden pompa güçlerini ifade etmektedir. Pompa güçleri geri yönde hareket ettikleri için - olarak denklemin başındaki katsayı ile ifade edilmiştir.  $k = 1, 2, 3, 4 \dots \dots, n + m$ 'e kadar olan indisler ise  $z = 0$  noktasından  $z = L$  noktasına doğru ileri yönde ilerleyen sinyal güçlerini ifade etmektedir. Sinyal güçleri ileri yönde hareket ettikleri için + olarak denklemin başındaki katsayı ile ifade edilmiştir.  $\alpha_k, P_k, P_j, v_k, v_j$  ise sırasıyla indis'e göre zayıflama katsayısı, pompa ve sinyal güçleri, pompa ve sinyal dalga boylarını ifade etmektedir. Bununla birlikte  $\Gamma, A_{eff}$  sırasıyla polarizasyon faktörünü ve fiberin etkin alanını ifade etmektedir. Polarizasyon faktörü, pompa ve sinyaller aynı yöne doğru hareket ediyorsa 1, karşı yöne doğru hareket ediyorsa 2 katsayısı ile çarpılmaktadır [6].

FRY modelinde Raman kazanç katsayısı çok önemli rol üstlenmektedir. Raman kazanç katsayısı uyarılmış Stokes dalgalarının birbirleriyle etkileşim gücü ile ifade edilir. Bu doğrultuda Stokes dalgalarının şiddeti pompa ile sinyal arasındaki fark ile ölçülmesinden dolayı, kullanılan fiber kabloya göre Raman kazanç katsayısı ölçülür. Şekil 1'de standart tek modlu optik fiber kabloya ait Raman kazanç katsayısı görsel ile sunulmuştur [4].

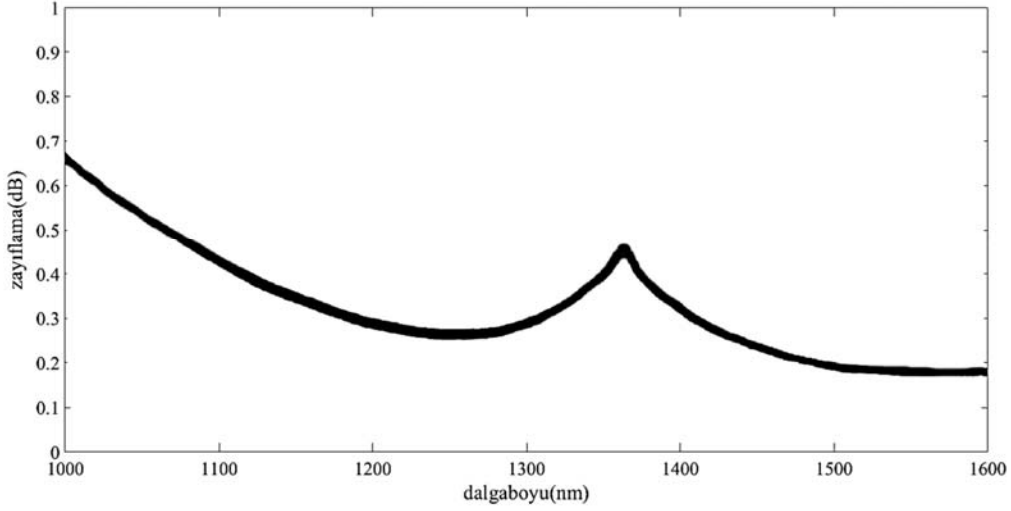


**Şekil 1.** Standart tek modlu optik fiber kabloya ait Raman kazanç katsayısı  
(Raman gain coefficient of standard single mode optical fiber cable)

Şekil 1'deki görsel, deneysel çalışmalar sonucu elde edilmiş ve literatüre sunulmuştur. Grafik incelendiğinde Raman kazancı: katsayı \*  $10^{-13}$  m/W çarpanı ile ifade edilir. Burada belirtilen katsayı, pompa ile sinyal arasındaki dalga boyu farkı ile oluşmaktadır. Grafiğe göre dalga boyu farkı 100 nm (13 THz) civarlarında Raman kazancının en yüksek seviyesine ulaştığı anlaşılmaktadır. Ayrıca Raman kazanç grafiği dikkatli incelendiğinde kazanç spektrumunun 40 THz civarında olduğu görülmektedir. Bu kazanç aralığı neredeyse fiber optik sistemlerin her noktasında kullanılabilir. Bu sebeple sinyalin S, C ve L bandında esnek ve basit şekilde kuvvetlendirilmesi FRY'lerin avantajını ön plana çıkarmaktadır [23]. Yukarıda FRY modelinde yer alan zayıflama katsayısı, tüm optik fiber sistemler için büyük önem taşımaktadır. Zayıflama katsayısı, fiber optik kablunun tek veya çok modlu olması ve içerisindeki yabancı madde miktarına göre değişiklik göstermektedir. Şekil 2'de tek modlu SMF-28 standart optik fiber kabloya ait zayıflama eğrisi görülmektedir [4].

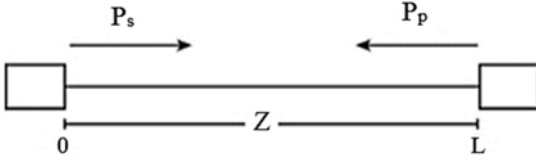
Şekil 2 incelendiğinde zayıflama katsayısı 1300 nm bandında 0.5 dB/km, 1550 nm bandında 0.2 dB/km olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuçlardan yola çıkarak FRY modeli oluştururken zayıflama katsayısının kısmen daha yüksek olduğu dalga boylarına pompaların yerleştirilmesi, zayıflama katsayısının kısmen daha düşük olduğu dalga boylarına ise sinyallerin yerleştirilmesi daha uygun olacaktır. Şekil 3'de, çalışma kapsamında oluşturulan sistemin basit gösterimi sunulmuştur.

Şekil 3 incelendiğinde, çalışma kapsamında oluşturulan dağıtık FRY'nin fiberin her noktasında sürekli kuvvetlendirme yapacağı anlaşılmaktadır. Sistem çalıştırıldığında dalga boyları 1520-1620 nm arasında 100 adet sinyal ve dalga boyları 1400-1510 nm arasında değişken sayıda pompalar belirli kilometre aralığında birbirlerine zıt harekete başlayacaklardır. Sinyaller optik fiberde ilerlerken bir yandan zayıflamadan etkilenerek gücünü kaybedecek fakat aynı zamanda Raman pompa kuvvetlendiricilerin etkisi ile belirli mesafe sonunda belirli güçte optik fiberin diğer ucuna ulaşacaktır. Sistemde bulunan tüm pompa ve sinyaller denklemden anlaşılacağı üzere birbirlerinden etkilenenlerdir. Burada kritik nokta, sistem lineer olmadığı için rastgele seçilen pompa dalga boyu ve pompa güç değerleri için L noktasına ulaşan tüm sinyaller tamamen farklı güçte olacaktır. Bizim bu çalışmadaki amacımız sinyallerin mümkün



Şekil 2. SMF-28 standart optik fiber kabloya ait dalga boyuna göre zayıflama katsayısı  
(Attenuation coefficient according to wavelength of SMF-28 standard optical fiber cable)

olduğunca aynı seviyede optik fiber çıkışına ulaştırarak sistemin daha verimli çalışmasını sağlamaktır [24].



Şekil 3. Sistem düzeneğinin basit gösterimi  
(Simple representation of the system assembly)

### 2.2. İkili Arama Denklemli Adaptif Yapay Arı Kolonisi (Adaptive Artificial Bee Colony with Binary Search Equation)

YAK algoritması için önerilen arama denklemlerinin bir kısmı odaklanmayı güçlendirirken bir kısmı da çeşitlendirmeyi güçlendirir. Adaptif arama denklemi stratejisini kullanmak için de bu iki davranışı güçlendirecek iki örnek arama denklemi kullanılmıştır. Örnek arama denklemleri aşağıda yer alan Eş. 2'de sunulmuştur.

$$\begin{aligned} 1. v_{i,j} &= x_{i,j} + [-\delta, +\delta](x_{r1,j} - x_{r2,j}) \\ 2. v_{i,j} &= x_{gb,j} + [-\delta, +\delta](x_{i,j} - x_{r1,j}) \end{aligned} \quad (2)$$

Burada  $x_{r1,j}$  ve  $x_{r2,j}$  rasgele seçilen iki çözümün  $j$ . değişken değeri,  $x_{gb,j}$  o ana kadar bilinen en iyi çözümün  $j$ . değişken değeri ve  $\delta$  parametresi ölçeklendirme faktörüdür. 1. arama denklemi rasgele çözümlere yönlendirdiği için çeşitlendirmeyi güçlendirirken 2. arama denklemi en iyi çözüme yönlendirdiği için odaklanma davranışına katkı sağlar. Ayrıca her denklemi kullanarak birden çok boyutu değiştirebilmek mümkündür. Yani klasik arama denklemlerinde sadece  $j$ . boyut değiştirilmekte iken önerdiğimiz yaklaşımda bu seçeneğin yanında birden çok boyutun ve tüm boyutların değiştirilmesi mümkün hale getirilmiştir. Bu durum değişikliğinin sıklığı ( $ds$ ,  $1 \leq ds \leq D$ ) parametresi ile belirlenmektedir [18]. Önerdiğimiz arama denklemi belirleme stratejisinde, her bir problem için uygun  $ds$  değerini ve arama denklemini adaptif bir şekilde

belirlemek için, rastgele oluşturulmuş bir arama denklemleri listesi önerilmiştir. Listedeki her satır üç sütunlu bir yapı olarak tasarlanmıştır. İlk sütun bir arama denklemi içerir, ikinci sütun  $ds$  değerini içerir ve üçüncü sütun karşılık gelen satır arama denkleminin başarı değerini içerir. 7 satırlı örnek bir liste yapısı Tablo 1'de gösterilmektedir. Tablo 1'de gösterildiği gibi, her satır farklı arama denklemi karakteristiğini ve dolayısıyla farklı arama yeteneğini temsil eder. Listenin her satırındaki denklem, sırayla algoritmanın her iterasyonunda (işçi arı ve gözlemci arı adımlarında) kullanılır. Eğer bir arı ilgili denklemi kullanarak bir çözümü iyileştirirse, ilgili satırdaki denklemin başarı sayısı bir artırılır ve işçi ve gözlemci arı adımları sonundaki toplam iyileştirme miktarı hesaplanır. Daha sonra ilgili satırdaki arama denkleminin başarı değeri aşağıdaki Eş. 3'de yer alan formül kullanılarak güncellenir;

$$BD_t = BD_t \frac{itr}{MaxItr} + IM_t \quad (3)$$

Burada  $BD_t$   $t$ . satırdaki başarı değerini,  $Itr$  algoritmanın o anki iterasyon değerini,  $MaxItr$  maksimum iterasyon sayısını ve  $IM_t$   $t$ . satırdaki iyileşme miktarını ifade eder. Denklemde de görüldüğü gibi  $BD_t$ 'nin her güncelleme sırasında önceki değerinin bir kısmı azaltılır. Bu azaltma oranı iterasyonlar devam ettikçe azalır. Böylece ilk iterasyonlarda yanlıcı olabilecek başarımların etkisi azaltılmış olur [19]. Tablo 1'de örnek bir arama denklem listesi sunulmuştur.

Listedeki tüm arama denklemleri işçi ve gözlemci arılar tarafından kullanıldığında, listedeki denklemler başarı değerlerine göre azalan düzende sıralanır ve listenin boyutu ( $lb$ ) Eş. 4'de yer alan denklem kullanılarak küçültülür.

$$lb = \begin{cases} 2 & \text{Eğer } lb < 2 \text{ ise} \\ \left\lfloor lb * \frac{MaxItr - Itr}{MaxItr} \right\rfloor & \text{Aksi durumda} \end{cases} \quad (4)$$

Bu yaklaşım ile, yalnızca iki uygun arama denklemi kalana kadar liste daraltılır. Böylece ele alınan problem için sadece uygun arama denkleminin adaptif olarak seçilmesi algoritmanın çalıştırılması sırasında sağlanmış olur. "İkili Arama Denklemli Adaptif Yapay Arı Kolonisi (İADAYAK)" adını vermiş olduğumuz algoritmanın sözde kodu Tablo 2'de gösterilmiştir [20].

**Tablo 1.** Örnek bir arama denklemi listesi (An example list of search equations)

Arama Denklemi	$ds$	Başarı Değeri (BD)*
$v_{i,j} = x_{i,j} + [-\partial, +\partial](x_{r1,j} - x_{r2,j})$	1	0
$v_{i,j} = x_{gb,j} + [-\partial, +\partial](x_{i,j} - x_{r1,j})$	3	0
$v_{i,j} = x_{gb,j} + [-\partial, +\partial](x_{i,j} - x_{r1,j})$	7	0
$v_{i,j} = x_{i,j} + [-\partial, +\partial](x_{r1,j} - x_{r2,j})$	2	0
$v_{i,j} = x_{i,j} + [-\partial, +\partial](x_{r1,j} - x_{r2,j})$	D	0
$v_{i,j} = x_{gb,j} + [-\partial, +\partial](x_{i,j} - x_{r1,j})$	4	0
$v_{i,j} = x_{gb,j} + [-\partial, +\partial](x_{i,j} - x_{r1,j})$	D	0

\*Başarı değeri her satır için başlangıçta sıfır (0) olarak kabul edilir.

**Tablo 2.** İADAYAK algoritmasının sözde kodu (Pseudo-code of the İADAYAK algorithm)

```

1: Başlangıç()
2: while sonlandırma kriterine gelene kadar do
3:   İşçiAraAdımı()
4:   GözcüAraAdımı()
5:   KaşifAraAdımı()
8:   if Arama denklemi listesindeki tüm denklemler kullanılmış then
9:     Listeyi daralt
10:  end if
11: end while
12: en iyi çözümü döndür
13:
14: function Başlangıç()
15:   İADAYAK' nin parametrelerini ayarla ve arama denklemi listesini rasgele oluştur
16:   Başlangıç popülasyonunu rastgele oluştur
17:    $X_i$  çözümlerine göre fitness ( $f_i$ ) fonksiyonunu hesapla
18: fonksiyonu bitir
19:
20: function İşçiAraAdımı()
21:   for 1'den i ye kadar Aramaİşlemi( $X_i$ ) do
22:     end for
23: fonksiyonu bitir
24:
25: function GözcüAraAdımı()
26:   her çözümün ( $p_i$ ) olasılık değerini hesapla
27:   for 1'den i ye kadar do
28:     rastgele değer belirle  $r = \text{random}(0,1)$ 
29:     if  $r < p_i$  then Aramaİşlemi( $X_i$ )
30:     end if
31:   end for
32: fonksiyonu bitir
33:
34: function Aramaİşlemi( $X_i$ )
35:   listeden  $t$  sıradaki arama denklemini seç
36:    $t$  kullanarak  $V_i$  'leri üret
37:    $V_i$  nin fitness değerini hesapla
38:    $X_i$  ve  $V_i$  arasında aç gözlü seçimi uygula
39:   if  $V_i > X_i$  then
40:      $t$  değerlerini başarılı şekilde güncelle
41:      $deneme=0$ 
42:   else
43:      $deneme= deneme+1$ 
44:   end if
45: fonksiyonu bitir
46:
47: function KaşifAraAdımı()
48:   if  $\max(deneme_i) > Limit$  then
49:      $X_i$  ' yi yeniden ilkle
50:   end if
51: fonksiyonu bitir

```



### 2.3. Denklem Çözümüne Ait Bilgiler (Information on the Solution of Equations)

Denklem 1’de detaylı incelenen Raman kuvvetlendirici denklemi Eş. 5 ve Eş. 6’da her bir sinyal kanalının yükseltgenme faktörüne göre tekrar matematiksel olarak ifade edilir:

$$I_j \equiv \int_0^L P_j(z) dz, j = 1, 2, 3, \dots, n + m \quad (5)$$

$$G_k \equiv \frac{P_k(L)}{P_k(0)} = \exp\left(-a_k L + \sum_{j=n+1}^{m+n} g_{jk} I_j\right)$$

$$\exp\left(\sum_{j=1}^n g_{jk} I_j\right) = G_{L,k}, G_{G,k} \quad (6)$$

Sonucu karşımıza çıkmaktadır. Formüldeki  $G_{L,k}$  birinci exponensiyel kuvveti yani optik sinyallerin birbirleri ile etkileşimini ve fiber kayıplarını kapsar.  $a_k, L, I_j$  sırasıyla; optik zayıflama, optik fiber uzaklığı, sinyal ve pompa güçlerini ifade etmektedir [21].  $g_{jk}$  ise Raman kuvvetlendirici formülünde yer alan  $\frac{g_{vj}(v_j - v_k)}{\Gamma_{A_{eff}}}$  işleminin sonucunu gösterir. Formüldeki  $G_{G,k}$  ise ikinci exponensiyel kuvveti yani pompaların birbirleriyle olan etkileşimini ifade eder.  $G_k$  net kazanç değeri, optik fiberin diğer ucunda her sinyal değeri için 1’e yaklaştıkça her bir sinyal çıkış değeri, başlangıç değerine yaklaşacaktır [7].

Yukarıda detaylı şekilde açıklanan  $G_{L,k}$  değeri çözümlenerek grafik halinde aşağıda sunulmuştur. Şekil 4 incelendiğinde 100 adet optik sinyalin optik fiber içerisinde 0 noktasından 50 km’ye ilerlemesi sonucunda oluşan  $G_{L,k}$  açıkça görülmektedir. Sinyallerin  $G_{L,k}$  değerleri şekildeki gibi olduğu için sinyallerin optik fiberdeki kayıpları ters yönde gönderilen pompa güçleri tüketilerek karşılanacaktır. Pompaların birbiriyle olan etkileşimini ifade eden  $G_{G,k}$  değerinde yer alan pompa güçleri ve dalga boyları, İADAYAK algoritması ile bulunmuştur. Elde edilen net kazanç değerleri, sonuçlar kısmında sunulmuştur.

### 2.4. Denklem Çözümünde Kullanılan Nümerik Değerler (Numerical Values Used in Solving Equations)

Çalışmanın nümerik örneği 1500 nm bandında yapılmıştır. Optik sinyaller 1520-1620 nm (197- 187 THz) arası, pompalar ise 1400-1510 nm (199-214 THz) arası seçilmiştir. Ayrıca  $A_{eff}$  değeri  $50 \mu m^2$ , polarizasyon faktörü 2,  $L=50$  km ve sinyallerin giriş değerleri 1mW olarak seçilmiştir. Bununla birlikte sinyaller arası boşluk 100 GHz olarak belirlenmiştir. Şekil 1 ve Şekil 2’de yer alan Raman kazanç katsayısı ve zayıflama değerleri algoritmaya nümerik olarak işlenmiştir. Denklem 1, Denklem 3 ve Denklem 4’ de yer alan matematiksel ifadeler algoritmaya adapte edilmiştir. Deneysel sonuçlar Intel i7 1.8 GHz işlemcili ve 16 GB bellek kapasiteli bir bilgisayar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Her bir örnek için 10 bağımsız çalıştırma üzerinden elde edilen sonuçlar raporlanmıştır. Her bir çalıştırma için maximum fonksiyon çağırım değeri  $10^5$  olarak seçilmiştir. Sonrasında boyut sayısı sırasıyla 4, 8, 16 olarak seçilerek oluşturulan tüm sistem İADAYAK algoritması ile işletilmiş ve elde edilen sonuçlar ilgili bölümde sunulmuştur.

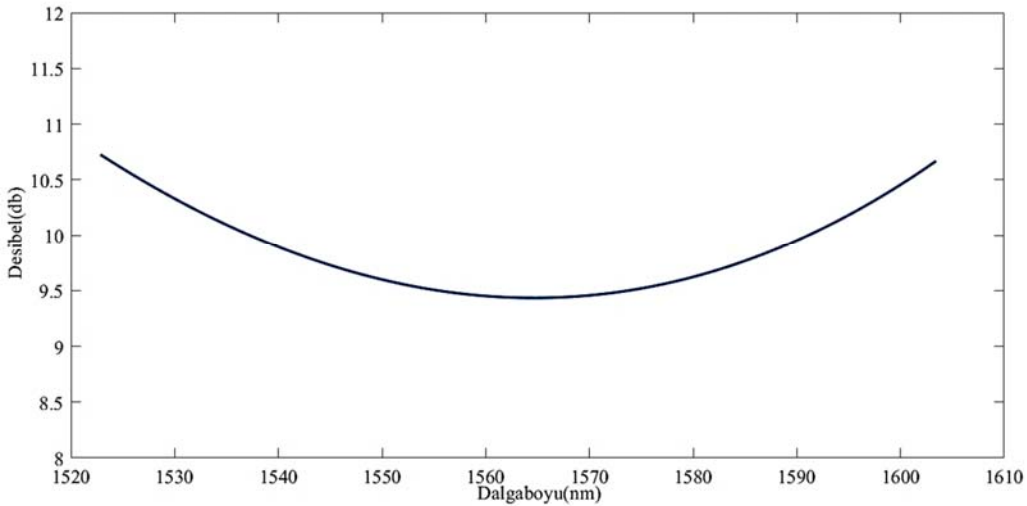
## 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

### 3.1. İADAYAK Algoritması Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar (Results Obtained Using İADAYAK Algorithm)

Bu bölümde sisteme sırasıyla 4, 8 ve 16 adet pompa sinyali eklenmiş ve sistem çalıştırılmıştır.

4 adet pompa sinyali kullanılarak kurulan Raman yükseltici sistemi için elde edilen en iyi pompa dalga boyu ve güç değerleri Tablo 3’te sunulmuştur.

Tablo 3 incelendiğinde, pompa sinyallerinin giriş güçlerinin toplamının yaklaşık 550 mW olduğu gözlenmiştir. Ayrıca elde edilen ortalama net kazanç farkı 0.16 dB olarak tespit edilmiştir. 8 adet pompa sinyali kullanılarak kurulan Raman yükseltici sistemi için elde edilen en iyi pompa dalga boyu ve güç değerleri Tablo 4’de sunulmuştur.



**Şekil 4.** 100 adet optik sinyalin dalga boylarına göre dB cinsinden elde edilen  $G_{L,k}$  değeri  
(The  $G_{L,k}$  value obtained in dB according to the wavelengths of 100 optical signals)

**Tablo 3.** 4 adet pompa sinyali kullanılarak elde edilen optimum dalga boyu ve güç değerleri  
(Optimum wavelength and power values obtained using 4 pump signals)

Dalga boyu(nm)	1447,5	1419,4	1432,3	1482,6
Giriş Gücü(mW)	41,2	83,8	58,8	220,5

Tablo 4 incelendiğinde, pompa sinyallerinin giriş güçlerinin toplamının yaklaşık 550 mW olduğu gözlenmiştir. Ayrıca elde edilen ortalama net kazanç farkı 0.043 dB olarak tespit edilmiştir. 16 adet pompa sinyali kullanılarak kurulan Raman yükseltici sistemi için elde edilen en iyi pompa dalga boyu ve güç değerleri Tablo 5'te sunulmuştur. Tablo 5, incelendiğinde pompa sinyallerinin giriş güçlerinin toplamının yaklaşık 550 mW olduğu gözlenmiştir. Ayrıca

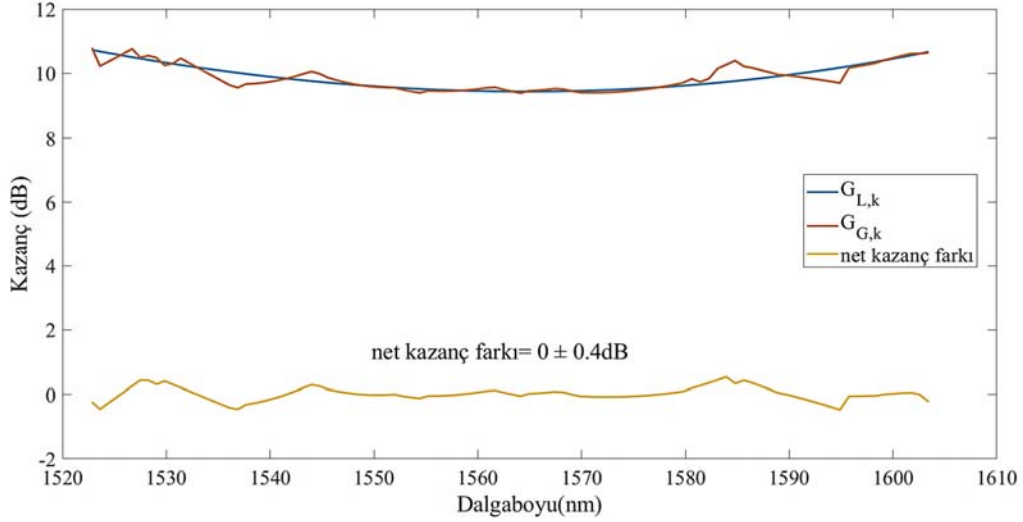
elde edilen ortalama net kazanç farkı 0.028 dB olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte net kazanç değeri ne kadar düşük seviyede olursa sonuç değerlerinin optimum seviyeye yaklaştığı görülmektedir. Yukarıda tablolar halinde sunulan 4, 8, 16 pompa sinyali için bulunan optimum değerler görselleştirilerek aşağıda sunulmuştur. Yukarıda görselleri verilen Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7 incelendiğinde yatay eksen boyunca uzanan mavi çizgiyi,  $G_{L,k}$  değerlerinin oluşturduğu

**Tablo 4.** 8 adet pompa sinyali kullanılarak elde edilen optimum dalga boyu ve güç değerleri  
(Optimum wavelength and power values obtained using 8 pump signals)

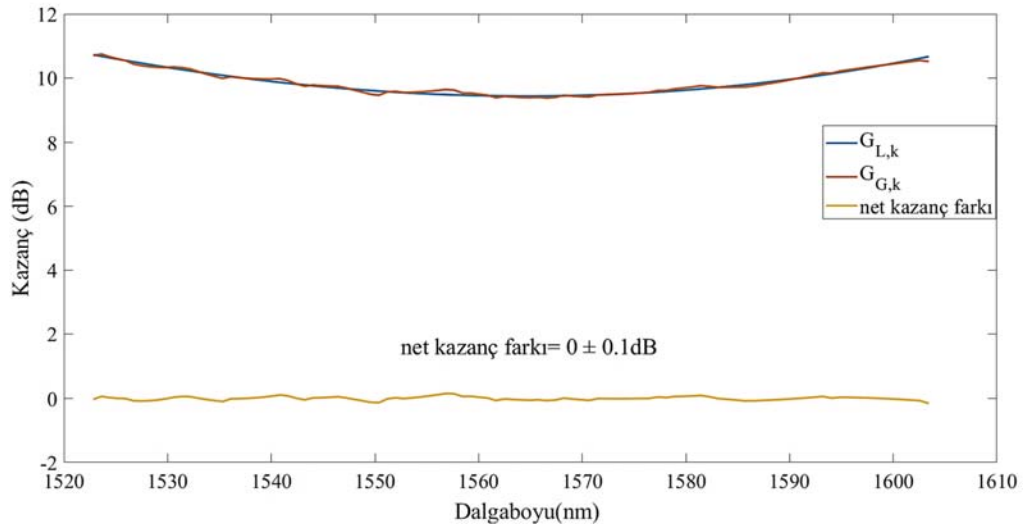
Dalga boyu(nm)	1453,2	1444,1	1430,6	1400,9	1402,1	1506,5	1461,2	1414,6
Giriş Gücü(mW)	30,5	45,7	40,3	24,1	108,3	233,7	28,8	70,5

**Tablo 5.** 16 adet pompa sinyali kullanılarak elde edilen optimum dalga boyu ve güç değerleri  
(Optimum wavelength and power values obtained using 16 pump signals)

Dalga boyu(nm)	1431,9	1426,5	1465,4	1402,7	1488	1404,6	1415	1452,6	1442,9	1442,2	1425,7	1459,3	1412,2	1503	1419	1448,8
Giriş Gücü(mW)	36	8,2	17,7	57,4	22,7	16	2,1	26,1	23,2	9,7	4	19,5	51,2	197	34,8	2

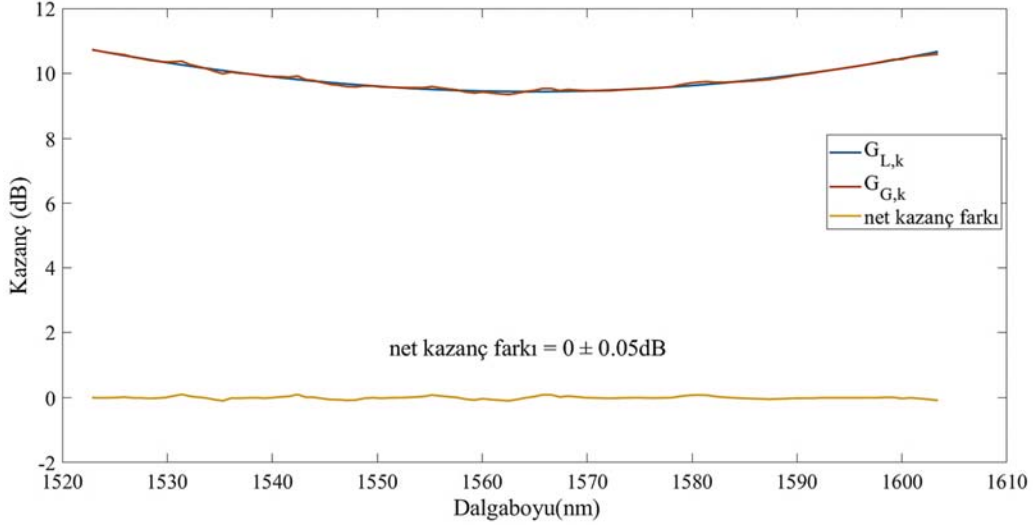


**Şekil 5.** 4 adet pompa kullanılarak elde edilen sonuçlar (Results obtained using 4 pumps)



**Şekil 6.** 8 adet pompa kullanılarak elde edilen sonuçlar (Results obtained using 8 pumps)





Şekil 7. 16 adet pompa kullanılarak elde edilen sonuçlar (Results obtained using 16 pumps)

görülmektedir. Mavi çizginin üzerinde yer alan kırmızı çizgiyi ise pompa sayısına göre elde edilen optimum pompa sinyali değerlerinin sisteme yerleştirilmesi sonucu oluşan sinyal kazanç değerlerinin oluşturduğu görülmektedir. Kırmızı ve mavi çizgiler ne kadar birbirlerine örtüşürlerse sinyallerin kazancı o ölçüde düzleşecektir. Ayrıca görsellerde yer alan sarı çizgi de sinyallerin örtüşme miktarını net kazanç değeri bakımından ifade etmektedir. Bununla birlikte pompa sayısı arttıkça net kazanç farkının azaldığı ve çizgilerin örtüşme miktarının arttığı açıkça görülmektedir. Literatür incelendiğinde oluşturulan FRY sistemlerinin birbirlerinden farklı olduğu göze çarpmaktadır. Örneğin bazı araştırmacılar 40, 50, 80 ve 100 değişken sayıda optik sinyalle çalışmışlar, bazı araştırmacılar ise farklı optik fiber kazanç ve zayıflama katsayıları ile sistem düzeneklerini kurmuşlardır [8, 21, 22]. Ayrıca sinyallerin birbirleri arasındaki boşluklar ve pompaların alabileceği en büyük ve en küçük dalga boyları her çalışma için birbirlerinden farklı olduğu gözlemlenmiştir [7, 23, 24]. Bununla birlikte sinyallerin iletim mesafeleri incelendiğinde çalışmalar arasında farklılıklar olduğu göze çarpmaktadır [25, 26]. Bu gözlemler ışığında, oluşturulan FRY sistemi ve İADAYAK algoritmasının işletilmesi sonucu 4, 8 adet pompa ve 100 sinyal kullanılarak elde edilen net kazanç değerleri diğer çalışmalarda ulaşılan net kazanç değerlerine kıyasla daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. 16 adet pompa sayısı kullanılarak elde edilen net kazanç değeri diğer çalışmalarda ulaşılan net kazanç değerine kıyasla birbirlerine benzer olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca Sistemde kullanılan pompaların toplam güçleri açısından kıyaslandığında farklı sinyal sayıları ve farklı optik fiber kazanç ve zayıflama katsayıları ile çalışıldığı için literatür ile farklı sonuçlar ortaya çıkmıştır.

#### 4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada SMF-28 türü fiberlerde kazancı düzleştirilmeye çalışılan 100 adet sinyal için sisteme gönderilen pompa sinyallerinin optimum güçleri ve dalga boyları, İkili Arama Denklemli Adaptif Yapay Arı Kolonisi (İADAYAK) algoritması ile çözümlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde 4 adet pompa kullanılarak elde edilen ortalama net kazanç farkı 0.16 dB, net kazanç farkı ise  $0 \pm 0,4$ dB olarak bulunmuştur. 8 adet pompa kullanılarak elde edilen ortalama net kazanç farkı 0.043 dB, net kazanç farkı ise  $0 \pm 0,1$ dB ortaya çıkmıştır. 16 adet pompa kullanılarak elde edilen ortalama net kazanç farkı 0.028 dB, net kazanç farkı ise  $0 \pm 0,05$ dB olarak tespit edilmiştir.

Çalışmada, 16 pompa kullanılarak elde edilen optimum pompa güçleri arasında düşük güç değerli pompalar bulunduğu için pratikte kullanılacak pompa sayısının 8 adet olması daha uygun görülmektedir. Geliştirilen algoritma sayesinde belirli pompa sinyalleri için en iyi değerler tespit edilmiştir. Bu sayede gerçek zamanlı sistemler için gerekli olan hız ve performans aynı zamanda elde edilmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda yapay zekâ teknolojisi kapsamında üretilen algoritmaların gelişmesi paralelinde bu çalışmaya benzer optimizasyon problemlerinin optimum performanslarının gelişeceği ve bu sayede elde edilen verimin artacağı düşünülmektedir.

#### Kaynaklar (References)

1. Yücel M., Öztürk N. F., Torun M., Yücel M., Design and application of a fiber Bragg grating array based temperature measurement system, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (3), 957-964, 2017.
2. Durak F., Navruz İ., Altuncu A., Design and production of long period fiber grating using electrical arc technique. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 28 (1), 27-32, 2013.
3. Yücel M., Göktaş H. Haldun, Fiber Raman yükselteçlerde pompalama yönünün kazanç spektrumuna etkisi üzerine bir simülasyon, Journal of Polytechnic, 9 (3), 161-164, 2006.
4. Agrawal G. P., Nonlinear Fiber Optics, Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century, 2007.
5. Günday A., Karlık S., Yılmaz G., The impact of temperature and strain formations on young and shear modul in usage of optical fiber distributed sensing for power cables, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (3), 517-525, 2014.
6. Perlin V. E., Winful H. G., Optimal Design of Flat-Gain Wide-Band Fiber Raman Amplifiers, Journal of Lightwave Technology, 20, 250-254, 2002.
7. Perlin V. E., Winful H. G., On Distributed Raman Amplification For Ultrabroad-Band Long-Haul WDM Systems, Journal of Lightwave Technology, 20, 409-416, 2002.
8. Hu J., Marks B. S., Menyuk C. R., Flat-Gain Fiber Raman Amplifiers Using Equally Spaced Pumps, Journal of Lightwave Technology, 22, 1519-1522, 2004.
9. Jiang H. M., Xie K., Wang Y. F., Shooting Algorithm And Particle Swarm Optimization Based Raman Fiber Amplifiers Gain Spectra Design, Optics Communications, 283, 3348-3352, 2010.
10. Liu T., Liu L., Chen J., Jiang H., Sun Q., Xie Y., Optimal Design of Raman Fiber Amplifier Based on Terminal Value Optimization Strategy and Shuffled Frog Leaping Algorithm, Journal of Modern Optics, 65, 1680-1687, 2018.

11. Jiang H. M., Xie K., Wang Y. F., Novel Design of Flat Gain Spectrum Raman Fiber Amplifiers Based On Ant Colony Optimization, *IEEE Photonics Technology Letters*. 23, 1823–1825, 2011.
12. Chen J., Jiang H., Optimal Design of Gain-Flattened Raman Fiber Amplifiers Using a Hybrid Approach Combining Randomized Neural Networks and Differential Evolution Algorithm, *IEEE Photonics Journal*, 10 (2), 1-15, 2018.
13. Zibar D., Brusin A., Inverse System Design Using Machine Learning: The Raman Amplifier Case, 38, 736–753, 2020.
14. Sörensen K., Metaheuristics The Metaphor Exposed, *International Transactions in Operational Research*. 22, 3–18, 2015.
15. Karaboga D., Basturk B., A Powerful and Efficient Algorithm For Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm, *Journal of Global Optimization*, 39, 459–471, 2007.
16. Yolcu V., Yücel M., Aydın D., Solution of fiber Raman amplifier model using binary search equation-based adaptive artificial bee colony algorithm. *Optical Engineering*, 62 (2), 026105, 2023.
17. Yavuz G., Popülasyon Temelli Metasezgiseller için Genelleştirilmiş Çatıların Tasarımı ve Gerçekleştirimi, Doktora, Eskişehir Teknik Üniversitesi, B. Mühendisliği A.B.D, 2019.
18. Aydın D., Yavuz G., Stützle T., ABC-X: A Generalized, Automatically Configurable Artificial Bee Colony Framework, *Swarm Intelligence*. 11, 1–38, 2017.
19. Yavuz G., Aydın D., Improved Self-adaptive Search Equation-based Artificial Bee Colony Algorithm with Competitive Local Search Strategy, *Swarm and Evolutionary Computation*, 51, 1-22, 2019.
20. Liao T., Aydın D., Stützle T., Artificial bee colonies for continuous optimization: Experimental analysis and improvements. *Swarm Intelligence*, 7 (4), 327-356, 2013.
21. Neto B., Teixeira A. J., Wada N., André P. S., Efficient use of hybrid genetic algorithms in the gain optimization of distributed Raman amplifiers. *Optics Express*, 15 (26), 17520-17528, 2007.
22. Liu X., Lee B., Optimal Design for Ultra-Broad-Band Amplifier, *Journal of Lightwave Technology*, 21, 3446–3455, 2003.
23. Liu X., Lee B., A Fast And Stable Method for Raman Amplifier Propagation Equations, 11, 2163-2176, 2003.
24. Achtenhagen M., Chang T. G., Nyman B., Hardy A., Analysis Of A Multiple-Pump Raman Amplifier, *Applied Physics Letters*. 78, 1322, 2001.
25. Han Q., Ning J., Zhang H., Novel Shooting Algorithm For Highly Efficient Analysis of Fiber Raman Amplifiers, *Journal of Lightwave Technology*, 24, 1946–1952, 2006.
26. Cui S., Liu J., A Novel Efficient Optimal Design Method For Gain-Flattened Multiwavelength Pumped Fiber Raman Amplifier, *Ieee Photonics Technology Letters*, 16, 2451–2453, 2004.